

# SAMENVATTEND VERSLAG

## MONITORING “BROERSBANK”

<b>Project</b>	<b>Vlaamse Baaien – Monitoring “Broersbank”</b>
<b>Dossiernr</b>	<b>214339</b>
<b>Titel</b>	Monitoring Broersbank – samenvattende nota
<b>Document nr.</b>	214339_R13_20170728
<b>Auteur</b>	Jaak Monbaliu
<b>Goedgekeurd</b>	Jaak Monbaliu
<b>Datum</b>	27/07/2017 (draft)

# Inhoud

<b>INHOUD .....</b>	<b>2</b>
<b>LIJST FIGUREN .....</b>	<b>2</b>
<b>LIJST TABELLEN .....</b>	<b>3</b>
<b>1. INLEIDING EN DOELSTELLINGEN.....</b>	<b>4</b>
<b>2. VERWERKING GOLFMETINGEN .....</b>	<b>6</b>
<b>3. WERKWIJZE GOLFMODELLERING .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1. MODELOPBOUW .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2. INDICATOR VOOR PERFORMANTIE GOLFMODELLERING .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.1. QI-KWALITEITSINDICATOR .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.2. S-SCORE RESULTATEN EN TOEPASSING BIJ DE ANALYSE VAN STORMCONDITIES .....</b>	<b>12</b>
<b>4. BIJKOMENDE BEVINDINGEN UIT MASTERPROEVEN KU LEUVEN .....</b>	<b>15</b>
4.1. <i>Gemeten wind en gemengde randvoorwaarden (J. Warlop, 2016).....</i>	<i>15</i>
4.2. <i>Alternatieve dieptebrekingsformulering (Royakkers, M.Sc. Thesis, 2017) .....</i>	<i>15</i>
<b>5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....</b>	<b>17</b>
5.1. <i>Conclusies .....</i>	<i>17</i>
5.1.1. <i>Meetgegevens .....</i>	<i>17</i>
5.1.2. <i>Modelresultaten over de 28 maanden en de 19 geselecteerde stormen .....</i>	<i>17</i>
5.2. <i>Aanbevelingen voor verder onderzoek .....</i>	<i>19</i>
<b>6. REFERENTIELIJST .....</b>	<b>21</b>
<b>REFERENCE TO THIS REPORT .....</b>	<b>26</b>

## Lijst Figuren

Figuur 1. Locatie van de vijf boeien (rode cirkels). .....	5
Figuur 2. Opzet van modelstructuur met uitwisseling van informatie (B.C. = boundary conditions (randvoorwaarden)). In de figuur onderaan zijn de verschillende roosters te zien met op de figuur rechts in het rood het gedraaide rooster voor het SWAN kuststrookmodel. ....	9
Figuur 3. Modelresultaat Hmo, Tm02, piekgolfrichting en S-score voor storm 14-16 februari 2016 voor model settings CM50, CW50 en CM52 voor de boei op locatie BRB5DB. ....	14

## Lijst Tabellen

Tabel 1.	Coördinaten (WGS 84) en benaming van de boeien (noteer dat de nieuwe dieptes afkomstig zijn van lokale metingen bij het laatste onderhoud in februari 2016).....	6
Tabel 2.	Maand van onderhoud voor de verschillende boeien (periode december 2013 - april 2016). Naam van de boei (A94 staat voor aKUST94) en opgemeten waterdiepte op de boeipositie (aangeduid met de boeilocatienaam, zie Figuur 1).....	7
Tabel 3.	Dekking van de boeimetingen per maand voor de periode december 2013 – maart 2016. ....	8
Tabel 4.	Overzicht van de geselecteerde settings voor simulatie volledige meetperiode.....	11
Tabel 5.	Start- en einddatum voor de geselecteerde stormen periode dec 2013 - maart 2016.....	11
Tabel 6.	Hm0 indicator per 3 maanden van december 2013 tot en met maart 2016. (*) de laatste periode beslaat 4 maanden .....	12
Tabel 7.	Tm02 indicator per 3 maanden van december 2013 tot en met maart 2016. (*) de laatste periode beslaat 4 maanden .....	12

# 1. INLEIDING EN DOELSTELLINGEN

Het ophogen van zandbanken is één van de belangrijke deelprojecten van het vlaggenschipproject Vlaamse Baaien en één van de belangrijke hoofdstukken van het Masterplan 2050. Op dit ogenblik is er echter een leemte in de kennis waardoor het niet mogelijk is te besluiten of het ophogen van zandbanken al dan niet een efficiënte maatregel is om de kustveiligheid te verhogen. Het is daarom noodzakelijk dat men bepaalt in welke mate ondiepe (al dan niet artificieel verhoogde) zandbanken voor de kust een dempend effect (kunnen) hebben op (super) stormgolven die de kust bereiken. Deze (super)stormgolven belasten de zeewering en hun grootte speelt dus een belangrijke rol bij de bepaling van de veiligheid van de Vlaamse kust.

De doelstelling van het project 214339 “Vlaamse baaien – Monitoring Broersbank” is om de voortplanting, dissipatie en aangroei van golfenergie dat zich van offshore naar onze kust toe beweegt, te bestuderen enerzijds via metingen, anderzijds via numerieke modellering met behulp van spectrale golfmodellen. Dit project is een vervolgproject op project 212176 “Vlaamse baaien – Monitoring Broersbank” en daarom worden ook een aantal resultaten uit dit vorig project aangehaald en waar nodig of wenselijk wordt er ter verduidelijking ook nog regelmatig verwezen naar rapporten uit deze vorige studie. Beide studies werden uitgevoerd om het effect op de golfvoortplanting over ondiepe banken beter te begrijpen, waarbij bestaande golfmodellen kunnen getest worden en nieuwe, meer gedetailleerde golfmodellen kunnen ontwikkeld worden. De resultaten van dergelijke studies zijn dan ook zeer bruikbaar voor de optimalisatie van ontwerpen van maatregelen voor kustverdediging.

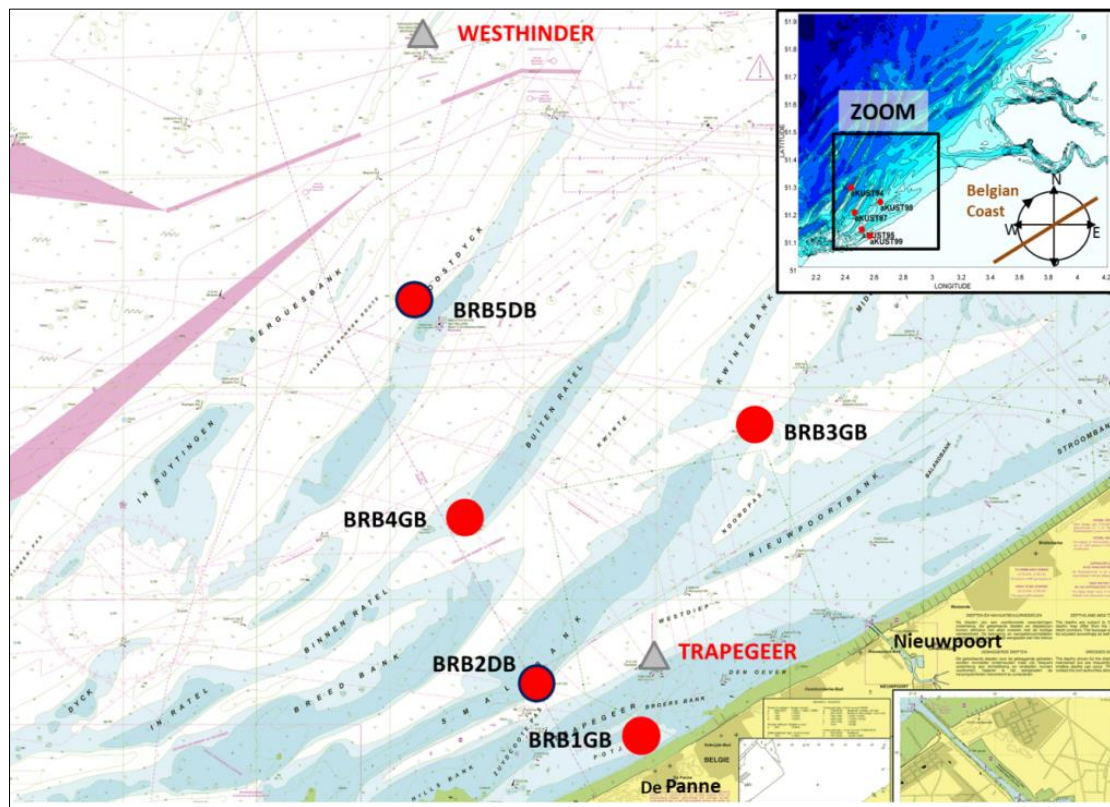
De meetboeien werden zo gepositioneerd dat ze een goed beeld kunnen geven van het verloop van de voortplanting en de dissipatie van de energie over de verschillende zandbanken. Wat betreft metingen zijn er eind november 2013 vijf golfboeien (2 directionele en 3 niet-directionele) uitgelegd, zie Figuur 1. Die werden begin april 2016 uit het water gehaald met uitzondering van boei BRB3GB die na beschadiging reeds in februari 2016 werd gerecupereerd.

Er werden verschillende rapporten gemaakt met betrekking tot de performantie van de metingen en het data-acquisitie systeem (zie rapporten \_R01, \_R05, \_R07, \_R09 en \_R10 van project 212176 en \_R01, \_R03, \_R5 en \_R09 van project 214339 in de REFERENTIELIJST).

Wat betreft modellering werd de volledige periode december 2013 tot en met maart 2016 gemodelleerd met het SWAN-Coherens model set-up, zie sectie 0. Ook daar werden verschillende rapporten van gemaakt, \_N02 en \_R06 in project 212176 en \_R04, \_R10, \_R11 en \_R12 in project 214339, zie REFERENTIELIJST.

Om de kracht van de rekentools te demonstreren werd ook een korte studie gemaakt over het mogelijke effect van verhoging van de zandbanken voor onze kust, zie nota \_N01 project 214339 in REFERENTIELIJST. Gezien het hier over heel specifieke scenario's van verhoging ging, worden geen algemene besluiten uit dat rapport in dit samenvattend rapport overgenomen. De geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar het feitelijke rapport.

In voorliggend samenvattend rapport worden de verschillende bevindingen van deze studie “Vlaamse baaien – Monitoring Broersbank” toegelicht. Eerst wordt een overzicht gegeven van de performantie van het meetsysteem aan de hand van een samenvattende tabel. Vervolgens wordt de opzet van de modellering met het Coherens-SWAN model kort meegegeven. De performantie van het opgezette model wordt samengevat aan de hand van een aantal indicatoren. Als slot worden nog een aantal bevindingen meegegeven die bekomen werden in het kader van masterproeven en worden ook nog een aantal aanbevelingen voor verdere studie geformuleerd.



Figuur 1. Locatie van de vijf boeien (rode cirkels).

## 2. VERWERKING GOLFMETINGEN

De “Monitoring Broersbank” meetcampagne ging van start eind november 2013 en maakte gebruik van 5 golfboeien (2 directionele en 3 niet-directionele) gepositioneerd tussen de locaties Westhinder en de Broersbank, zie Figuur 1. De in situ metingen werden als een samenvatting van de spectrale gegevens frequent via satelliet doorgestuurd naar land. De ruwe data werden ook opgeslagen op geheugenkaartjes die zich in de boei bevinden en die kunnen uitgelezen worden bij onderhoud van de boei. Om verwarring tussen de benaming van de boeien (gebruikt in de satellietcommunicatie, zie Tabel 2) en van de locaties waar de boeien zich effectief bevinden te vermijden, wordt er in alle rapporten gewerkt met de benaming van de locaties (zie Tabel 1 **Error! Reference source not found.** en Figuur 1). De naamgeving van de locatie van de 5 boeien start met ‘BRB’. Het cijfer dat er op volgt is het nummer dat de locatie aanduidt. De twee laatste letters geven aan of het om een directionele boei (DB) of een gewone niet-directionele boei (GB) gaat. In Tabel 1 en Figuur 1 zijn ook de locaties en de coördinaten opgenomen van de golfmeetboeien Westhinder (directioneel) en Trapegeer (niet-directioneel). Deze twee boeien zitten in het Meetnet Vlaamse Banken en de verwerking van die metingen gebeurt door het Hydrometeo team van de Vlaamse Hydrografie. Deze metingen werden dan ook via deze dienst ter beschikking gesteld voor dit onderzoek.

De meetcampagne werd beëindigd in de eerste week van april 2016 (zie Tabel 2). Op 7 april 2016 werden de 4 resterende boeien eveneens definitief uit het water verwijderd. Bij deze operatie werden ook de inwendige geheugenkaartjes met alle ruwe data uitgelezen. De vijfde golfmeetboei (die op locatie 3) was al in februari 2016 uit het water genomen omdat die beschadigd bleek, vermoedelijk door een aanvaring. Er werd daar geen andere golfmeetboei meer uitgelegd. De golfmeetboei op locatie 4, werd ook in februari 2016 uit het water genomen maar werd wel vervangen door een andere meetboei van hetzelfde type.

LOCATIE	Breedtegraad	Lengtegraad	Diepte (m)
WHI	51.3888	2.4483	25.9
BRB5DB	51.2845	2.4400	21.8 *
BRB3GB	51.2323	2.6410	8.0
BRB4GB	51.1950	2.4653	3.6
BRB2DB	51.1326	2.5140	14.4
BRB1GB	51.1098	2.5696	7.1
TRG	51.1375	2.5830	3.4
* Deze dieptes werden gecorrigeerd van diepte bij de waakton (verkeerdelijk meegenomen in de vroege rapporten) naar diepte bij de golfboei.			

Tabel 1. Coördinaten (WGS 84) en benaming van de boeien (noteer dat de nieuwe dieptes afkomstig zijn van lokale metingen bij het laatste onderhoud in februari 2016).

		BRB5DB		BRB3GB		BRB4GB		BRB2DB		BRB1GB	
		boei	diepte (m LAT)	boei	diepte (m LAT)	boei	diepte (m LAT)	boei	diepte (m LAT)	boei	diepte (m LAT)
2013	Nov	A94	24.5	A98	8.0	A97	4.5	A95	14.4	A99	7.2
	Dec										
2014	Jan										
	Feb										
	Mrt	A95	21.0	A96	8.0	A98	4.5	A93	14.4	A97	7.2
	Apr										
	Mei										
	Jun										
	Jul										
	Aug										
	Sep	A95 *	21.8	A96	8.1	A99	4.5	A93	14.4		
	Okt	A94	21.8							A98	7.1
	Nov										
	Dec										
2015	Jan										
	Feb										
	Mrt							A95	\	A97	\
	Apr										
	Mei										
	Jun	A93	21.8	A96	8.1	A98	4.5				
	Jul										
	Aug										
	Sep							A94	14.4	A99	7.1
	Okt										
	Nov										
	Dec										
2016	Jan										
	Feb			x		A97	3.6				
	Mrt										
	Apr	x				x		x		x	

\* Boei op drift en daaropvolgend vervangen in de maand oktober; x : ophalen

**Tabel 2. Maand van onderhoud voor de verschillende boeien (periode december 2013 - april 2016). Naam van de boei (A94 staat voor aKUST94) en opgemeten waterdiepte op de boeioppositie (aangeduid met de boeilocatienaam, zie Figuur 1).**

Voor de verwerking van de meetgegevens worden twee verwerkingslijnen gehanteerd, namelijk één voor de verwerking van de data die via satellietcommunicatie binnenkomt en één voor de data die uitgelezen wordt van de geheugenkaartjes die zich in de boeien bevinden. Deze gegevens komen namelijk in andere bestanden die zowel in aantal als in type verschillend zijn. Details over de gehanteerde methodologie en de verwerkte resultaten kan men terugvinden in volgende rapporten (zie ook REFERENTIELIJST):

- Voor de via satelliet ontvangen data 212176\_R01/R03/R04/R07 (meetperiode december 2013 tot en met februari 2015) en 214339\_R01/\_R02/\_R05/\_R06 (meetperiode maart 2015 tot en met begin april 2016)

- Voor de data afkomstig van de geheugenkaartjes: 212176\_R02/\_R05 (meetperiode december 2013 - februari 2015) en 214339\_R03/\_R07/\_R08/\_R09 (meetperiode maart 2015 - begin april 2016)

Het komt erop neer dat twee sequenties van Matlab scripts geschreven zijn om de bestanden (om de 30 minuten) in te lezen en te verwerken tot vergelijkbare maandelijkse tijdreeksen:

- 1) Matlabstructuur per maandelijkse tijdreeks (data elke 30 minuten) van de volgende parameters voor elke boei:
  - GPS-coördinaten, Tijd, Golfparameters en Spectrale data
- 2) Tijdreeksen belangrijkste golfparameters: significante golfhoogte (Hm0), gemiddelde periode (Tm02) en golfrichting piek spectrum (Dirp); zie rapporten ruwe data).
- 3) Kruistabellen en golfroos (zie rapporten ruwe data).
- 4) Dataleemtes: onderstaande tabel toont in % de tijdsdekking van de data. Bij de data van de geheugenkaartjes werd de data voor 100% gerecupereerd.

LOCATIE		BRB5DB		BRB3GB		BRB4GB		BRB2DB		BRB1GB	
Data source		Sat	Kaart	Sat	Kaart	Sat	Kaart	Sat	Kaart	Sat	Kaart
2013	Dec	93.01%	100%	96.77%	100%	96.77%	100%	95.70%	100%	95.09%	100%
2014	Jan	95.16%	100%	99.46%	100%	99.46%	100%	100%	100%	100%	100%
	Feb	95.24%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99.48%	100%
	Mrt	91.40%	100%	93.55%	100%	94.49%	100%	92.47%	100%	93.41%	100%
	Apr	92.71%	100%	96.11%	100%	96.60%	100%	96.46%	100%	94.44%	100%
	Mei	100%	100%	99.46%	100%	99.46%	100%	96.77%	100%	98.39%	100%
	Jun	100%	100%	100%	100%	99.44%	100%	99.44%	100%	99.44%	100%
	Jul	99.46%	100%	100%	100%	99.46%	100%	97.85%	100%	96.24%	100%
	Aug	100%	100%	97.92%	100%	97.92%	100%	100%	100%	96.30%	100%
	Sep	82%	100%	98.75%	100%	96.53%	100%	97.78%	100%	98.75%	100%
	Okt	99.46%	100%	97.31%	100%	99.46%	100%	99.46%	100%	100%	100%
	Nov	98.89%	100%	96.67%	100%	98.96%	100%	98.33%	100%	100%	100%
	Dec	97.85%	100%	97.31%	100%	95.77%	100%	96.24%	100%	98.39%	100%
2015	Jan	95.16%	100%	95.70%	100%	95.70%	100%	93.62%	100%	97.31%	100%
	Feb	92.86%	100%	91.07%	100%	92.34%	100%	91.52%	100%	93.45%	100%
	Mrt	92.47%	100%	90.86%	100%	93.01%	100%	91.40%	100%	94.56%	100%
	Apr	93.89%	100%	93.89%	100%	91.25%	100%	90.00%	100%	93.89%	100%
	Mei	92.47%	100%	93.08%	100%	91.53%	100%	88.24%	100%	91.24%	100%
	Jun	88.33%	100%	88.96%	100%	88.82%	100%	89.17%	100%	89.44%	100%
	Jul	100%	100%	99.40%	100%	100%	100%	99.46%	100%	99.46%	100%
	Aug	97.45%	100%	98.32%	100%	97.85%	100%	98.39%	100%	97.85%	100%
	Sep	92.43%	100%	88.26%	100%	95.00%	100%	90.56%	100%	93.89%	100%
	Okt	94.22%	100%	94.02%	100%	95.16%	100%	94.09%	100%	94.62%	100%
	Nov	92.29%	100%	99.38%	100%	97.29%	100%	98.33%	100%	97.29%	100%
	Dec	99.40%	100%	98.32%	100%	99.40%	100%	100%	100%	96.71%	100%
2016	Jan	99.40%	100%	97.78%	100%	98.86%	100%	100%	100%	98.86%	100%
	Feb	99.35%	100%	86.14%	88.07%	93.46%	94.18%	100%	100%	99.35%	100%
	Mrt	99.87%	100%	Geen boei	Geen boei	98.92%	100%	100%	100%	99.87%	100%

Tabel 3. Dekking van de boeimetingen per maand voor de periode december 2013 – maart 2016.



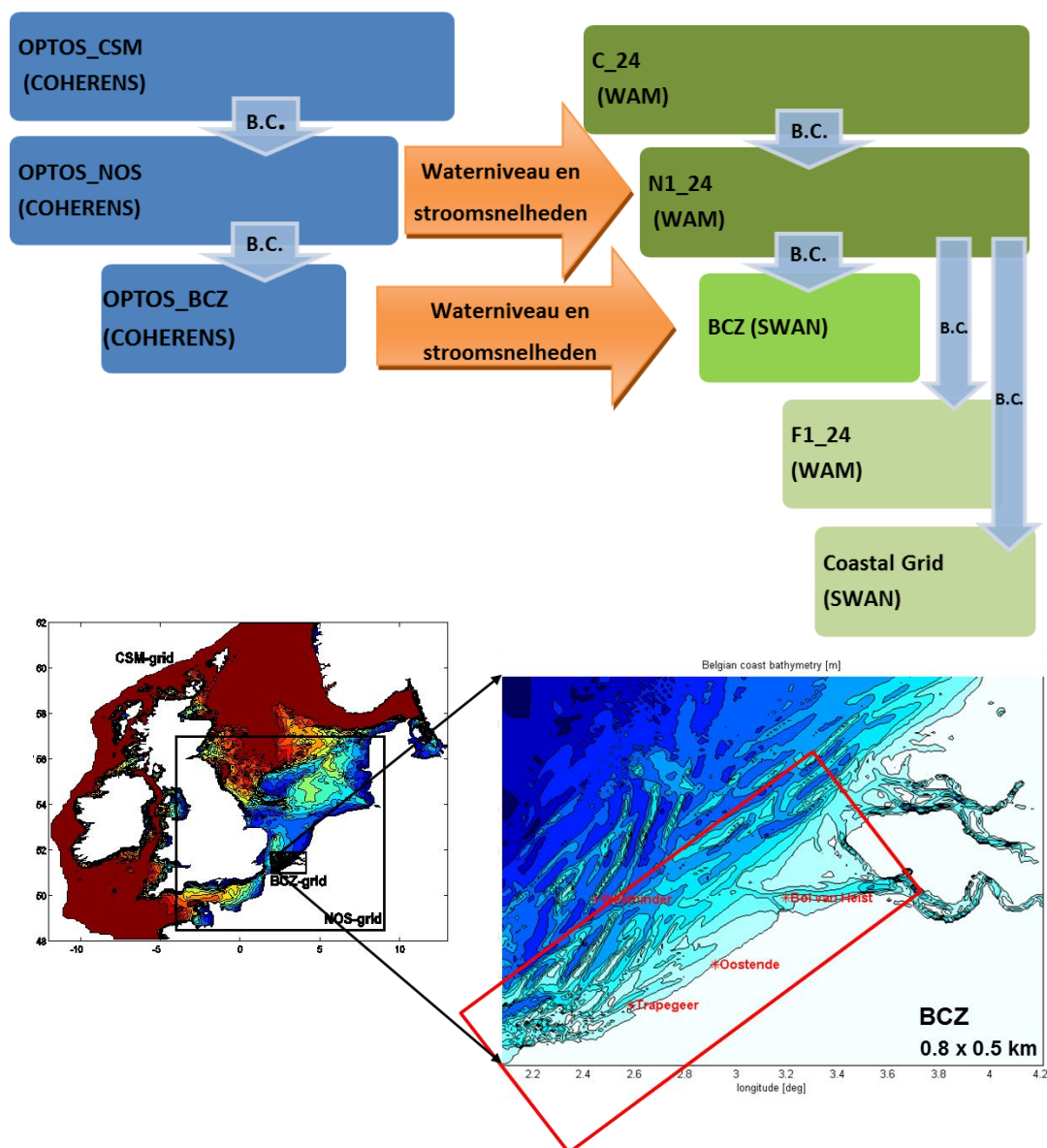
### 3. WERKWIJZE GOLFMODELLERING

#### 3.1. Modelopbouw

De periode van december 2013 tot en met maart 2016 (28 maanden) werd gemodelleerd voor 'alle condities' en voor 'storm condities' (de 19 geselecteerde stormen zijn terug te vinden in Tabel 5).

Hieronder is in het kort de gevolgde methodologie weergegeven, (zie rapport 212176\_R06- Resultaten Modellering in de REFERENTIELIJST voor meer details):

**Stap 1.** Opzet van de structuur van geneste en gekoppelde modellen (COHERENS voor stromingen en waterstanden, WAM en SWAN voor golven). Uiteindelijk leveren ze de nodige input voor het SWAN kuststrookmodel (golven). Figuur 2 geeft een overzicht van de verschillende modellen.



Figuur 2. Opzet van modelstructuur met uitwisseling van informatie (B.C. = boundary conditions (randvoorwaarden)). In de figuur onderaan zijn de verschillende roosters te zien met op de figuur rechts in het rood het gedraaide rooster voor het SWAN kuststrookmodel.

## Stap 2. Verkennend onderzoek model settings

- Analyse inputs: windvelden, waterstanden en stromingen
- een aantal runs uitgevoerd voor de volledige maand december 2013 als ook voor de Sinterklaasstorm van 6-8 december 2013):

Kuststrookmodel	(volledige dec2013)
Gevoeligheid golfrandvoorwaarden	(volledige dec2013)
Gevoeligheidsanalyse voor tijdstap	(Sinterklaasstorm)
Updates bathymetrie	(Sinterklaasstorm)
Gevoeligheid waarde bodemwrijving	(Sinterklaasstorm)

## Stap 3. Weerhouden settings voor de golfmodellering met SWAN kuststrookmodel (zie ook Tabel 4 en de bijhorende uitleg):

Windvelden:	ERA-Interim	
Stromingen en waterstanden (U,V):	uit Coherens BCZ (zie Figuur 2)	
Rekengrid voor golfmodellering kustzone	250mx250m	
Bron bathymetrische data	'WL 14_KZ'	
Tijdstap in het SWAN model	10 minuten	
Golfrandvoorwaarden:		
	<u>Gemeten spectra Westhinder boei op West-Noord-Oost domeinrand</u>	→ code CM50
	<u>Spectra gegeneerd met het WAM model</u>	→ code CW50
Bodemwrijving:		
	Default SWAN waarde JONSWAP factor bodemwrijving (=CM50)	
	<u>Halvering van waarde JONSWAP factor bodemwrijving</u>	→ code CM52

## Stap 4. Runs voor kuststrookmodel. Periode. Model settings CM50, CW50 en CM52 per maand en voor geselecteerde stormen. Resultaten beschikbaar voor de periode december 2013 – februari 2015.

## Stap 5. Kwaliteitsindicator voor de opvolging van de modelresultaten.

De volgende veel gebruikte statistische parameters werden weerhouden om modelresultaten en meetgegevens te vergelijken: RMSE (root mean square error), BIAS, SI (scatter index gedefinieerd als de root means square error gedeeld door de gemiddelde waarde van de metingen) en CO (correlatiecoëfficiënt). In overleg met de opdrachtgever werd vastgelegd om de volgende kwaliteitsindicatoren te gebruiken om de verbeteringen in de modelresultaten te kunnen waarnemen:

$$QI_{3maanden} = \frac{SI_{all\ cond\_BRB1GB} + SI_{all\ cond\_TRGGB1}}{2} \quad ; \text{gemiddelde SI volledige maand.}$$

$$QI_{stormen} = \frac{(SI_{storm\ cond\_BRB1GB} + SI_{storm\ cond\_TRGGB1})}{2} \quad ; \text{gemiddelde SI voor storm condities.}$$

## Stap 6. Verwerking en plotten van de berekeningen en communiceren van de indicators.

Samengevat worden dus volgende settings weerhouden voor de simulatie van de volledige meetperiode:

Run Code	Main settings
<b>CM50</b>	Bathymetry WL met overlay bathymetrische loding juni 2013 (WL14_KZ) Default bodemwrijving Jonswap = 0.067
<b>CW50</b>	Bathymetry WL met overlay bathymetrische loding juni 2013 (WL14_KZ) Default bodemwrijving Jonswap = 0.067
<b>CM52</b>	CM50 maar met wrijvingsconstante bodemwrijving Jonswap = 0.0335

**Tabel 4. Overzicht van de geselecteerde settings voor simulatie volledige meetperiode.**

De selectie van deze stormen kan men vinden in onderstaande Tabel 5:

Storm ID	Startdatum	Einddatum	Maand
1	05 dec 2013	08 dec 2013	Dec 2013
2	23 jan 2014	27 jan 2014	Jan 2014
3	10 mar 2014	13 mar 2014	Mar 2014
4	18 apr 2014	21 apr 2014	Apr 2014
5	02 mei 2014	04 mei 2014	Mei 2014
6	14 jun 2014	19 jun 2014	Jun 2014
7	08 jul 2014	12 jul 2014	Jul 2014
8	20 sept 2014	23 sept 2014	Sep 2014
9	21 okt 2014	24 okt 2014	Okt 2014
10	26 dec 2014	29 dec 2014	Dec 2014
11	31 jan 2015	03 feb 2015	Jan-Feb 2015
12	21 maart 2015	23 maart 2015	maart 2015
13	30 maart 16:00	02 april 2015 16:00	maart-april 2015
14	25 juli 2015 00:00	26 juli 2015 08:00	juli 2015
15	05 sep 2015 12:00	07 sep 2015 00:00	sep 2015
16	13 okt 2015 00:00	15 okt 2015 00:00	okt 2015
17	21 nov 2015 00:00	22 nov 2015 12:00	nov 2015
18	14 jan 2016 10:00	16 jan 2016 00:00	januari 2016
19	14 feb 2016 10:00	16 feb 2016 00:00	februari 2016

**Tabel 5. Start- en einddatum voor de geselecteerde stormen periode dec 2013 - maart 2016.**

## 3.2. Indicator voor performantie golfmodellering

### 3.2.1. QI-kwaliteitsindicator

De gemodelleerde significante golfhoogte  $H_{m0}$  en periode  $T_{m02}$  werden systematisch geplot voor de 7 boeilocaties (WHI, Trapegeer en de 5 boeien die speciaal voor deze campagne zijn uitgelegd), en ook statische parameters werden berekend niet alleen voor elke volledige maand van de meetcampagne, maar ook voor de geselecteerde stormen. Deze figuren en waarden kan men terugvinden in de modelleerrapporten.

Om op een overzichtelijke manier alle berekende statistische parameters te kunnen overzien (3 settings voor het model x 2 parameters Hm0 en Tm02 x 4 statistische parameters RMSE (root mean square error), BIAS (gemiddelde afwijking model en metingen), SI (scatter-index) en CO (correlatiecoëfficiënt) x 7 locaties x aantal gesimuleerde maanden en het aantal geselecteerde stormen), werd al in het eerste project 212176 in overleg met de opdrachtgever besloten om de performantie van de modellering te monitoren via een eenvoudige indicator gerelateerd aan de performantie van het model op locaties BRB1GB en TRGGB1. Uiteindelijk wil men vooral op posities dicht bij de kust weten hoe goed het model presteert (en hoe goed men de dissipatieprocessen heeft kunnen inschatten). Als eenvoudige indicator voor de performantie van het model werd gekozen voor een gemiddelde scatter-index voor elk van de drie weerhouden model settings (CM50, CW50 en CM52, zie Tabel 4) en dit voor zowel Hm0 als Tm02. Het gemiddelde wordt berekend voor een periode van 3-maanden en is bovendien het gemiddelde van de twee locaties BRB1GB en TRGGB1. Uit de bekomen indicator voor de drie weerhouden model settings, wordt de kleinste waarde weerhouden en aangeduid met 'QI\_3maand' wanneer ze berekend aan de hand van de alle waarden voor de volledige maand en met 'QI\_storm' indien berekend met waarden die afkomstig zijn runs voor storm condities (zie Tabel 6 voor Hm0 indicator en Tabel 7 voor Tm02). De formules voor deze parameters zijn terug te vinden in stap 5 van het modeleringsproces (zie hierboven). Hoe lager de waarde van de kwaliteitsindex des te beter het model scoort.

Hm0	Dec 2013-Feb 2014	Mar-Mei 2014	Jun-Aug 2014	Sep-Nov 2014	Dec2014-Feb2015	Mar-Mei 2015	Jun-Aug 2015	Sep-Nov 2015	Dec 2015-Mar 2016
QI_3maand	0.48	0.29	0.26	0.40	0.29	0.28	0.30	0.27	0.32
QI_stormen	0.23	0.16	0.16	0.21	0.26	0.16	0.23	0.19	0.09

**Tabel 6. Hm0 indicator per 3 maanden van december 2013 tot en met maart 2016.**

(\*) de laatste periode beslaat 4 maanden

Tm02	Dec 2013-Feb 2014	Mar-Mei 2014	Jun-Aug 2014	Sep-Nov 2014	Dec2014-Feb2015	Mar-Mei 2015	Jun-Aug 2015	Sep-Nov 2015	Dec 2015-Mar 2016
QI_3maand	0.13	0.12	0.12	0.13	0.10	0.11	0.12	0.10	0.12
QI_stormen	0.10	0.10	0.11	0.09	0.12	0.10	0.09	0.06	0.05

**Tabel 7. Tm02 indicator per 3 maanden van december 2013 tot en met maart 2016.**

(\*) de laatste periode beslaat 4 maanden

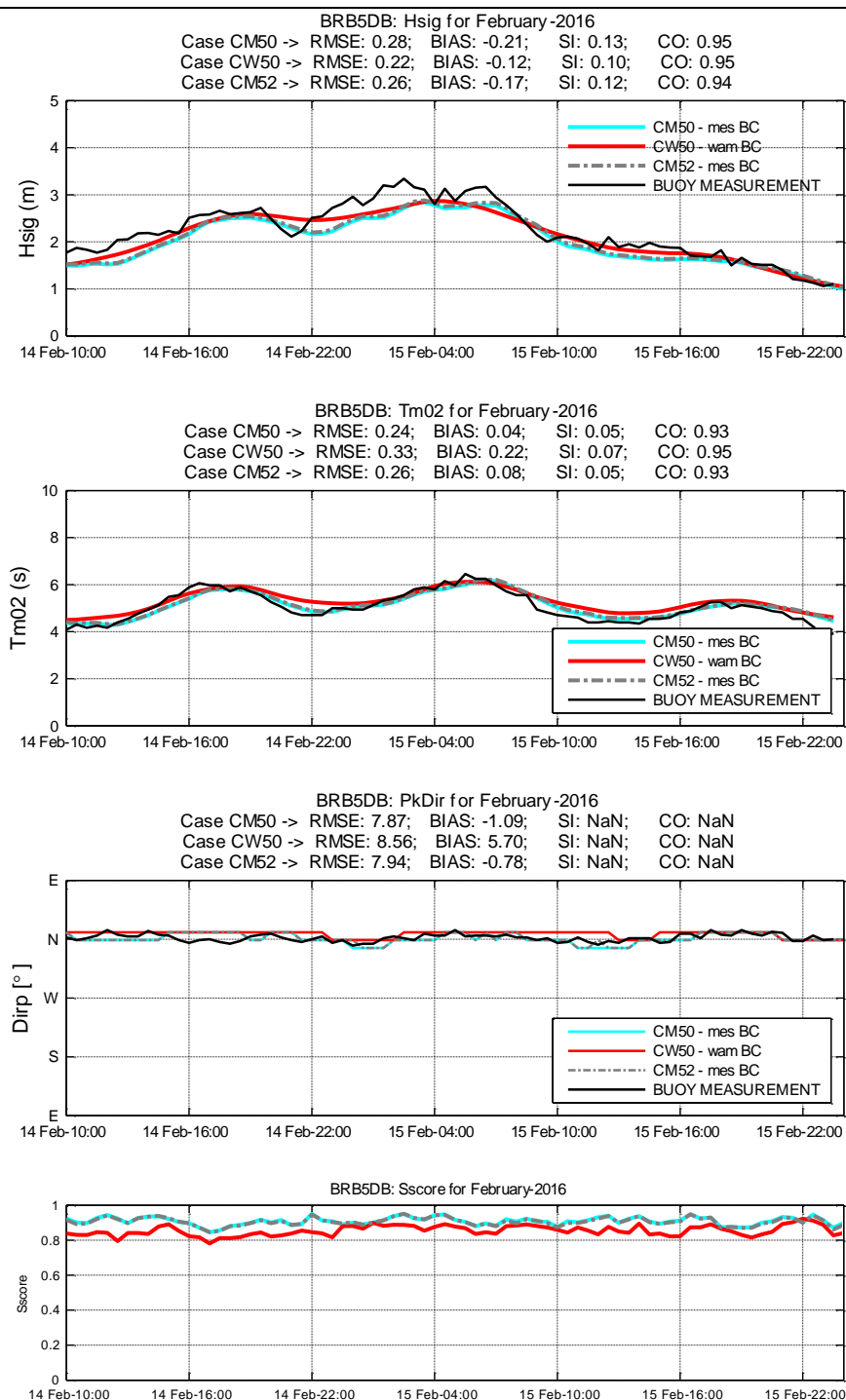
### 3.2.2. S-score resultaten en toepassing bij de analyse van stormcondities

De S-score is een eenvoudige en accurate methode om de overeenkomst van het model wat betreft de vorm van het frequentiespectrum weer te geven. Om spectra qua vorm met elkaar te vergelijken, worden ze eerst genormaliseerd zodat ze dezelfde energie-inhoud hebben. Daarna wordt gekeken in welke mate de twee spectra overlappen met elkaar. De score kan variëren tussen 0 en 1. Een score van 1 geeft een perfecte fit wat betreft de vorm tussen het gemeten en het gemodelleerde spectrum. Een score 0 zegt dat de twee spectra niets met elkaar gemeen hebben. De wiskundige details zijn terug te vinden in de ANNEX 1 van de modelrapporten van project

214339. Deze nieuwe indicator, complementair met andere statistieken, werd gebruikt om de performantie van het golfmodel bij het reproduceren van de golfobservaties met gegeven input, te beoordelen. Deze indicator is bijzonder handig om de spectra die alvast qua vorm niet accuraat gereproduceerd worden, te identificeren. Tot op heden bestaat er geen goede parameter om te zien hoe goed een golfspectrum als geheel wordt gereproduceerd, deze nieuwe parameter kan helpen om een betere selectie te maken van situaties (stormen) die voor verder onderzoek in aanmerking komen.

De S-score werd berekend voor de stormen vanaf maart 2015 (de periode van het project 212176 werd niet opnieuw geanalyseerd). Het is in het bijzonder interessant om deze resultaten in parallel te bekijken met Hm0, Tm02 en Dirp. Als voorbeeld wordt dit voor boei BRB5DB getoond in Figuur 3. Op Figuur 3 is bijvoorbeeld duidelijk te zien dat de S-score systematisch beter is wanneer gemeten golfspectra als randvoorwaarden (modelopzet CM50 en CM52) worden opgelegd aan het model. Voor de andere locaties en andere stormen wordt verwezen naar de modelleringsrapporten in project 214339, met name de rapporten \_R04, \_R10, \_R11 en \_R12.

Alhoewel het moeilijk tot niet mogelijk is om de kwaliteit van de huidige resultaten eenduidig te vergelijken met modelsimulaties voor de aanvang van deze studie, werden in de rapporten van het BOREAS project (Mathys et al., 2011) statistische parameters gevonden van gelijkaardige berekeningen. Toch durven we te stellen dat er een merkbare verbetering is, in het bijzonder voor de berekende gemiddelde periodes (Tm02). De waarde van de bias zijn verschoven van een grootte orde 1s naar een grootte orde 0.25 s op locatie Westhinder. Ook root mean square error (RMSE) en scatter index (SI) zijn kleiner geworden. Voor de locaties dicht bij de kust (Bol van Heist in de Boreas studie en Trapegeer in deze studie) zien we ook een verbetering in de bias, rms error en scatter index voor de berekende gemiddelde periode Tm02. De verbeteringen voor de statistische parameters met betrekking tot de significante golfhoogte zijn iets minder spectaculair maar toch nog aanzienlijk. Bias blijft ongeveer hetzelfde (dicht bij nul), RMSE en SI verminderen met ongeveer 1/3. We mogen dus besluiten dat de implementatie van deze set van modellen nauwkeurigere resultaten geeft in vergelijking met die van uit de vroegere BOREAS studie (Mathys et al., 2011).



**Figuur 3. Modelresultaat Hmo, Tm02, piekgolfrichting en S-score voor storm 14-16 februari 2016 voor model settings CM50, CW50 en CM52 voor de boei op locatie BRB5DB.**

## **4. Bijkomende bevindingen uit masterproeven KU Leuven**

### **4.1. Gemeten wind en gemengde randvoorwaarden (J. Warlop, 2016)**

De scriptie van Warlop (2016) heeft aangetoond dat gemeten wind als input voor het SWAN golfmodel aanleiding geeft tot betere resultaten dan de gemodelleerde windsnelheid, afkomstig van de ERA-interim windvelden dataset. De windmetingen te Westhinder (snelheid en richting gekend per 10 minuten) werden uitgemiddeld over 30, 60 en 120 minuten. Aan de hand van een sensitiviteitsanalyse is er aangetoond voor de periode maart 2015 en voor storm 12 (zie Tabel 5) in die maand dat een uitmiddelingsperiode over 30 minuten kan beschouwd worden als de meest optimale uitmiddelingsperiode. Vooral de stijging van de correlatiecoëfficiënt (CO) is een gevoelige verbetering. Het gebruik van de gemeten wind bracht wel een stijging van de BIAS met zich mee nabij de kust (grotere overschatting van de significante golfhoogte). Het verder afstellen van de bodemprocessen diepte-geïnduceerd breken en bodemwrijving werd aanbevolen door Warlop (2016) als een verder te onderzoeken topic om de resultaten nabij de kust te verbeteren. Het effect van deze twee brontermen werden dan effectief onderzocht in de scriptie van Royakkers (2017), zie verder.

Warlop (2016) heeft tevens vastgesteld dat vooral golven afkomstig uit west of zuidwest instaan voor overschattingen van de significante golfhoogte. De oorzaak is met zekerheid grotendeels te wijten aan de keuze van de randvoorwaarden van het model. Bij de modellering in de Broersbankprojecten 212176 en 214339 werden zowel op de noordelijke, oostelijke als westelijke rand van het model de gemeten spectra op locatie Westhinder opgelegd. Golven die zich voortplanten naar de kust verliezen echter energie door dissiperende processen. Als het opgemeten energiespectrum op locatie Westhinder ook op de volledige westrand van het model wordt aangelegd, is er op die rand geen afname van energie naar de kust toe en wordt bijgevolg de golfenergie overschat die via deze rand het modelgebied binnenkomt. Zolang golven niet vanuit het westen het model binnenkomen gaat dit niet gepaard met fouten. Indien golven uit het westen of zuidwesten afkomstig zijn, een veel voorkomende situatie aan onze kust, krijgt men overschattingen van de significante golfhoogte. Deze overschatting van energie langsheen de westelijke rand verdwijnt door gebruik te maken van gemengde randvoorwaarden, zijnde gemeten golfspectra op de noordelijke rand van het model en met WAM gemodelleerde spectra op de westelijke en oostelijke rand. Merk op dat aan de zuidelijke rand van het model (de kust) geen energie wordt opgelegd of m.a.w. er kan langs deze kant geen energie binnenkomen in het modelgebied. Bij zuidelijke winden wordt dan alle golfenergie intern in het modelgebied gegenereerd.

### **4.2. Alternatieve dieptebrekingsformulering (Royakkers, M.Sc. Thesis, 2017)**

Het fysisch proces diepte-geïnduceerd breken speelt een belangrijke rol in kustregio's. Vanwege haar complex (niet-lineair) karakter wordt ze sterk geparametriseerd in stochastische golfmodellen zoals SWAN. Klassiek wordt er gebruik gemaakt van de formulering van Battjes en Janssen (1978). Deze stelt dat de maximale golfhoogte, waarbij golfbreking optreedt, wordt uitgedrukt in functie van een constante brekerindex  $\gamma$  (typisch waarde  $\gamma =$

0.73). Een recente versie van SWAN (41.10) bood de mogelijkheid een alternatieve parametrisatie te testen voor golfbreking in ondiep water, met name het  $\beta$ -kd model. In dit model, ontwikkeld door onderzoekers aan de TU Delft (Salmon et al., 2015), wordt zowel de lokale bodemhelling  $\beta$  als het genormaliseerd golfgetal  $\tilde{k}d$  ( $\tilde{k}$  is het karakteristiek golfgetal horend bij een golfspectrum en  $d$  is de waterdiepte) betrokken in een weging van de brekerindex. De  $\tilde{k}d$ -afhankelijkheid is gerelateerd aan de getijden door de lokale waterdiepte  $d$ . Fysisch gezien zorgt deze afhankelijkheid bij hoger water voor een toename van de brekerindex, in die mate dat golfbreking inactief wordt. Het model biedt tevens de mogelijkheid om de effecten van richtingsverspreiding mee te nemen via een heuristische partitionering van het golfspectrum. Op die manier kunnen de intrinsieke verschillen tussen unidirectionele (1D) en directioneel verspreide (2D) golfcondities in rekening gebracht worden. Beide parametrisaties voor diepte-geïnduceerd breken zijn onderzocht in een masterproef scriptie van Royakkers (2017) door middel van een gevoeligheidsanalyse. Naast dissipatie van golfenergie door diepte-geïnduceerd breken, werd ook dissipatie door bodemwrijving onderzocht. Meer in het bijzonder werd de constante bodemwrijvingscoëfficiënt van het JONSWAP model bestudeerd. De brontermen bodemwrijving en diepte-geïnduceerd breken werden in deze scriptie gekalibreerd voor de Sinterklaasstorm 2013 (storm 1 in Tabel 5) en gevalideerd voor de novemberstorm 2015 (storm 17 in Tabel 5).

De resultaten tonen aan dat het gekalibreerde  $\beta$ -kd model in staat is de voorspellingen van de golfkarakteristieken consistent te begroten voor zowel de Sinterklaasstorm 2013 als de novemberstorm 2015. Het gebruik van een variabele brekerindex en partitionering van het golfspectrum zorgt voor een reductie van de energieverliezen waardoor, in vergelijking met de formulering van Battjes en Janssen (1978), de voorspelde significante golfhoogte beter in overeenstemming is met de veldmetingen. De limiet voor de richtingsverspreiding van de golven blijkt daarbij een belangrijke parameter in het model te zijn.

Wat betreft de bodemwrijvingscoëfficiënt kon er geen eenduidig besluit worden genomen. Meer zeewaarts zorgt een lage bodemwrijvingscoëfficiënt (bv. 0.038) voor verbeteringen in de statistische parameters. Nabij de kust, met name bij golfboeien BRB1GB en TRGGB1, zijn de voorspellingen door SWAN meer in overeenstemming met de observaties bij gebruik van een hoge bodemwrijvingscoëfficiënt (bv. 0.067). Het gebruik van een constante bodemwrijving in het JONSWAP model brengt m.a.w. beperkingen met zich mee. Bijkomend onderzoek naar het gebruik van een wrijvingswet die de diepte-afhankelijkheid in rekening brengt, kan mogelijks een oplossing bieden om de energieverliezen beter te voorspellen.



## 5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1. Conclusies

#### 5.1.1. Meetgegevens

Het communicatiesysteem om golfgegevens door de seinen via satelliet heeft een vrij grote betrouwbaarheid. Meestal is de dekking hoger dan 95% van de tijd. Onderbrekingen lijken random en zelden voor alle boeien tegelijkertijd. De verkregen golfdata zijn ook betrouwbaar. Daarop zijn twee uitzonderingen: 1) de data van september 2014 voor de boei BRB5DB is gedeeltelijk onbetrouwbaar wegens een verankeringsprobleem; de boei ging op drift en werd later teruggevonden aan de Franse kust; en 2) heel sporadisch worden op boeilocatie BRB4GB onrealistische golfhoogtes gemeten (ook na de verwisseling van de boei op die locatie bij het onderhoud werd dit nog vastgesteld). De onrealistische golfhoogtes op BRB4GB zijn ook terug te vinden in de gedetailleerde tijdreeksen van het verticale verplaatsingssignaal. Er werd een methode ontwikkeld om die extreme metingen uit de reeks te filteren, zodat de goede metingen bruikbaar blijven.

De gegevens opgeslagen op de inwendige geheugenkaartjes van de boeien konden voor de volledige periode gerecupereerd worden. Daardoor is er 100% dekking van de meetgegevens. Deze data worden dan ook gebruikt voor de vergelijking met de modelresultaten.

#### 5.1.2. Modelresultaten over de 28 maanden en de 19 geselecteerde stormen

Na het bekijken en analyseren van de verschillende figuren en tabellen met statistische parameters in de verschillende modelleerrapporten, kunnen volgende bevindingen naar voor geschoven worden:

1. De kwaliteitsindicatoren zijn voor de continue simulatie vrij gelijklopend over de volledige periode. Ook de indicatoren voor de stormperiodes veranderen niet veel. Enkel voor de laatste periode (dec 2015 – maart 2016) presteert de indicator beter. Gezien het hier over slechts twee stormen gaat, is het niet direct duidelijk of dit puur toeval is. Mogelijks speelt hier ook de opgelegde randvoorwaarde voor de golven een rol aangezien omwille van problemen met de Westhinder golfboei, voor de periode januari 2016 tot eind maart 2016, gekozen werd om de gemeten spectra op locatie BRB5DB op te leggen aan de rand van het modelgebied (zie rapport 214339\_R12 in REFERENTIELIJST voor meer details). Alhoewel beide boeien nog vrij dicht bij elkaar liggen en ook de waterdiepte op beide locaties vergelijkbaar is, zijn er natuurlijk ook verschillen. Het is niet evident om dit op een systematische manier te onderzoeken en dergelijke studie viel buiten de mogelijkheden van dit bestek.
2. Halvering van de bodemwrijving (setting CM52) leidt niet tot betere waarden voor de statistische parameters. Over het algemeen scoren de kwaliteitsindicatoren bij deze modelsetting iets zwakker

dan bij de twee andere modelsettings op de ondiepe locaties. De significante golfhoogte wordt over het algemeen overschat en de BIAS, RMSE en SI zijn over het algemeen groter.

3. Zoals te verwachten, krijgt men heel goede waarden voor de statistische parameters op de boeilocaties die dicht bij de rand liggen voor de modelsettings CM50 en CM52. Dan worden namelijk gemeten golfrandvoorwaarden opgelegd. Verder weg van de rand en naarmate men meer en meer opschuift naar ondieper water verschilt dat gedrag. Model settings CM50 en CW50 geven dan vergelijkbare statistische parameterwaarden. Dit wijst eerder op een zekere uitmiddeling van cumulatieve fouten.
4. Golfhoogtes op locatie BRB4GB worden zowat continue onderschat en de afwijking is ook aanzienlijk groter dan op de andere boeilocaties (grotere negatieve BIAS) en dit voor elk van de modelsettings. Dit is zelfs meer uitgesproken voor stormcondities. Alhoewel deze locatie op de Buitenratel nog vrij ver van de kust ligt, heeft het feit dat de lokale diepte er geschat is op slechts 4,5m LAT een grote invloed op het bekomen resultaat. Relatief kleine verschillen in werkelijke bathymetrie en de bathymetrie die gebruikt is in het model kunnen tot vrij grote verschillen leiden in modelresultaat. Wellicht krijgen we daar ook veel sneller golfbreking. Opmerkelijk is echter dat in het onderzoek van Royakkers (2017) aangetoond werd dat de  $\beta$ -kd dieptebrekingsformulering van Salmon et al. (2015)), dankzij de variabele brekerindex en partitionering van het golfspectrum, er wel in slaagde de statistische parameters op locatie BRB4GB te verbeteren.
5. Warlop (2016) heeft aangetoond dat een combinatie van gemeten spectra als randvoorwaarde op de noordrand en WAM gemodelleerde spectra als randvoorwaarden op de westelijke en oostelijke rand van het modelgebied, tot betere resultaten leidt.

Op basis van de stormsimulaties (komende uit noordwestelijke richting) zijn er nog de volgende bevindingen:

6. De statistische parameters die bekomen worden voor de storm condities tonen over het algemeen betere waardes dan deze bekomen voor de volledige maand. Dit is ook te verwachten aangezien voor deze condities de aangelegde randvoorwaarden optimaal zijn voor deze studie. De enige uitzondering is locatie BRB4GB, waar uit de negatieve BIAS een onderschatting van de golfhoogte kan afgeleid worden gaande tot een maximale waarde van 26 cm. De moeilijkheid om op deze boeilocatie goede resultaten te bekomen werd al aangehaald hierboven in item 4. Daar werd ook aangegeven dat het gebruik van het  $\beta$ -kd dieptebrekingsmodel van Salmon et al. (2015) tot betere resultaten leidde.
7. Op het eerste zicht zou men verwachten dat door enkel N-NW stormen te selecteren, de statistische parameters vrij gelijklopend zouden zijn van storm tot storm. Er zit echter behoorlijk wat variatie op de bekomen waarden. Elke 'storm' is natuurlijk anders met een andere voorgeschiedenis en een ander verloop. De kortere periodes die genomen worden voor deze stormen geven dan ook aanleiding tot meer variabiliteit (er gebeurt weinig of geen uitmiddeling).

8. De S-score geeft bijkomend inzicht in hoe goed de vorm van het golfspectrum wordt gemodelleerd. Dit geeft beter inzicht hoe de golfspectra evolueren in de tijd. De passages waar gemeten en gesimuleerde spectra erg van elkaar verschillen, zijn de meest interessante momenten vanuit onderzoeksstandpunt.
9. Voor de driemaandelijke indicatoren bij continue simulatie 'QI\_3maand' en bij stormsimulaties 'QI\_stormen' is er niet direct een seizoenale patroon zichtbaar.

## 5.2. Aanbevelingen voor verder onderzoek

We beschikken hier over een excellente dataset dat heel wat perspectieven biedt voor verder onderzoek. Hieronder worden verschillende suggesties geformuleerd.

1. Verfijning van het rekenrooster en de gebruikte bathymetrie. Momenteel wordt gewerkt met een rekenrooster van 250mx250m. Een verfijning van tot een rekenrooster van bijvoorbeeld 50mx50m kan tot een verbetering leiden. Alhoewel dit natuurlijk de rekentijd aanzienlijk zal verhogen, loont het de moeite om dit in elk geval te doen voor een beperkt aantal stormen. Bij de verfijning van het rekenrooster zou ook op een systematische manier moeten onderzocht worden op welke manier men best de bathymetrie voor het rekenrooster opstelt uitgaande van 'ruwe' bathymetrische data. Waar bijvoorbeeld voor navigatietoepassingen het meest ondiepe punt in een rooster cel bepalend kan zijn, is dat voor hydrodynamische en golfmodellen niet noodzakelijk hetzelfde.
2. Voor de kustnabije locaties Trapegeer en BRBGB1 (en voor locatie BRBGB4) speelt de waterstand relatief gezien een belangrijkere rol bij de modellering dan voor de andere boeilocaties. Een gedetailleerd onderzoek naar het verschil in gemeten en gesimuleerde waterstand en de invloed daarvan op de gesimuleerde golfresultaten is een belangrijke stap om inzicht te krijgen in het feit dat de modelresultaten op de minst diepe boeilocaties minder goed zijn dan op de andere boeilocaties. Indien blijkt dat er een verband tussen het verschil in gesimuleerde en gemeten waterhoogte en de gesimuleerde golfresultaten, kan gekeken worden naar een manier om systematisch gemeten waterstanden te 'assimileren' in het hydrodynamisch model. Daarmee kan de fout op de gemodelleerde waterstanden verminderd worden. Naar alle waarschijnlijkheid kan dat ook leiden tot een vermindering van de fout op de gemodelleerde golfhoogtes op de minst diepe boeilocaties.
3. Verdere onderzoek naar het te gebruiken dissipatiemodel voor diepte-geïnduceerde breking. De alternatieve dieptebrekingsformulering, het  $\beta$ -kd model, van Salmon et al. (2015) is reeds getest voor een beperkt aantal stormen door Royakkers (2017) en gaf betere resultaten op locatie BRB4GB. De onverwachte resultaten op locatie BRB4GB zijn in veel opzichten interessant omdat dieptebreking daar zeker een belangrijke rol speelt in stormcondities. Bijkomend onderzoek start best met het analyseren van recente bathymetrische peilingen in die zone. Een nieuwe peiling in die zone is ook wenselijk. Het simuleren van meerdere stormperiodes (Tabel 5 en bijkomende meetgegevens) kan

een globaler beeld geven over de prestaties van het model. Gezien de waterdiepte een belangrijke rol speelt bij dieptebreking, is het wel belangrijk dat suggesties 1 en 2 ook verder en wellicht eerst uitgewerkt worden..

4. Gebruik van een ander bodemwrijvingsmodel met natuurlijk de moeilijkheid om de noodzakelijke wrijvingsparameter(s) te bepalen. In SWAN zijn er naast de gebruikte JONSWAP formulering voor de bodemwrijving nog andere formuleringen beschikbaar. Royakkers (2017) gaf als aanbevelingen mee om te kijken naar een diepteafhankelijke wrijvingsparameter.
5. De gebruikte ERA-Interim windvelden hebben nog een vrij grove resolutie in de tijd (6-uurlijkse windvelden). Hogere resolutie windvelden, zowel in tijd (bijvoorbeeld uurlijkse windvelden) als in ruimte kunnen meer detail geven. In dat opzicht zou er ook gebruik kunnen gemaakt worden van gemeten windsnelheden voor de wind input in het kuststrookmodel. Daar komen wel een aantal praktische problemen bij kijken zoals bijvoorbeeld opvullen van leemtes in gemeten wind en welke uitmiddeling over de tijd wordt er best gebruikt voor de gemeten wind. Warlop (2016) heeft al aangetoond dat het gebruik van gemeten wind, betere resultaten opleverde.
6. Golven die uit westelijke richting komen worden over het algemeen minder goed gemodelleerd. Toch spelen zij een belangrijke rol aan onze kust. Het is de dominante windrichting en de brekende golven zullen voor langstransport van sedimenten zorgen. Eén van de denkpistes om de modelresultaten te verbeteren is om gemeten en berekende golfrandvoorwaarden te combineren tot een nieuwe verbeterde golfrandvoorwaarde. Warlop (2016) toonde al aan dat dit effectief tot betere resultaten leidde voor de stormen die hij had gemodelleerd, maar mogelijks dient dit probleem van 'slanting fetch' meer fundamenteel aangepakt te worden.
7. Studie en interpretatie van de verschillen tussen gemeten en gemodelleerde golfspectra op basis van een S-score (dat een maat geeft voor de overeenkomst tussen twee spectra), is een manier om systematisch minder goed gemodelleerde periodes uit te kiezen voor verder onderzoek. Uitbreiding van de S-score van 1D naar 2D kan mogelijks bijkomend inzicht geven. Bij dergelijke uitbreiding is het zinvol om op basis van energiepartities naar de resultaten van een spectraal golfmodel te kijken.

## 6. REFERENTIELIJST

*De referenties naar rapporten die in het kader van de projecten 212176, 214339 en 214341 werden geschreven worden hieronder per project meegegeven. Dit rapport vat enkel de bevindingen uit de projecten 212176, 214339 samen. De rapporten van het project 214341 worden hier ter volledigheid mee opgenomen in de referentielijst.*

- Battjes, J. A., & Janssen, J. P. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering (pp. 569-587). Hamburg: New York, ASCE.
- Mathys P., De Rouck J., Fernandez L., Monbaliu J., Van den Eynde D., Delgado R., Dujardin A. Brussels, 2011. Belgian Ocean Energy Assessment (BOREAS). Final Report.: Belgian Science Policy – 157 p. (Research Programme Science for a Sustainable Development).
- Royakkers, J., 2017. Gevoeligheidsanalyse van bodemwrijving en diepte-geïnduceerde golfbreking in het SWAN golfmodel toegepast op de Belgische kustwateren. Master thesis Ingenieurswetenschappen: bouwkunde. KU Leuven.
- Salmon, J. E., Holthuijsen, L. H., Zijlema, M., van Vledder, G., & Pietrzak, J. D. (2015). Scaling depth-induced wave-breaking in two-dimensional spectral wave models. *Ocean Modelling*, 87, 30-47.
- Warlop, J., 2016. Naar een optimale implementatie van het SWAN golfmodel voor toepassingen aan de Belgische kust. Master thesis Ingenieurswetenschappen: bouwkunde. KU Leuven.

### **Rapporten Project Broersbank 212176**

- Komijani, H., Ortega Yamamoto, J. Monbaliu, 2014. *Monitoring Broersbank – Concept modellering*. Broersbank\_212176\_N02 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 17-10-2014.
- Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2014. Monitoring Broersbank boeidata – satelliet datarapport periode dec2013 – mar2014. Monitoring Broersbank\_212176\_R01 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 17-10-2014.
- Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2014. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode december 2013-maart 2014. Monitoring Broersbank\_212176\_R02 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 17-10-2014.
- Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2014. Monitoring Broersbank boeidata – satelliet datarapport periode Apr2014–Aug2014. Monitoring Broersbank\_212176\_R03 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap

Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 21-10-2014.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2014. Monitoring Broersbank boeidata – satelliet datarapport periode Sep2014 – Nov2014. Monitoring Broersbank\_212176\_R04 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 18-12-2014.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2014. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode april 2014-augustus 2014. Monitoring Broersbank\_212176\_R05 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 16-12-2014.

Ortega Yamamoto, H., H. Komijani, J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank modelstudie –Resultaten Modelling December 2013 - Februari 2015. Monitoring Broersbank\_212176\_R06 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 15-05-2015.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank boeidata – satelliet datarapport periode Dec2014 – Feb2015. Monitoring Broersbank\_212176\_R07 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 31-03-2015.

Ortega Yamamoto, H., H. Komijani, J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank- Samenvattend verslag (December 2013-februari 2015). Monitoring Broersbank\_212176\_R08 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 15-05-2015.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode september 2014-november 2014. Monitoring Broersbank\_212176\_R09 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 25-08-2015.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode december 2014- februari 2015. Monitoring Broersbank\_212176\_R10 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 25-08-2015.

### **Rapporten Project Broersbank 214339**

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank – Dissipatieprocessen bij verschillende ophogingsscenarios van zandbanken. Broersbank\_214339\_N01 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap

Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 30-08-2016.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank boeidata – Satelliet datarapport periode Mar2015-Mei2015 Monitoring Broersbank boeidata. Monitoring Broersbank\_214339\_R01 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 07-07-2015.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank boeidata – Satelliet datarapport periode Jun2015-Aug2015 Monitoring Broersbank boeidata. Monitoring Broersbank\_214339\_R02 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 13-10-2015.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2015. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode Mar2015-Mei2015. Monitoring Broersbank\_214339\_R03 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 09-12-2015.

Ortega Yamamoto, H., H. Komijani, J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank – Resultaten Modellerling (periode Mar 2015 – Mei 2015). Monitoring Broersbank\_214339\_R04 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 18-07-2016.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank boeidata – Satelliet datarapport periode Sep2015-Nov2015 Monitoring Broersbank boeidata. Monitoring Broersbank\_214339\_R05 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 09-02-2016.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank boeidata – Satelliet datarapport periode Dec2015-Apr2016 Monitoring Broersbank boeidata. Monitoring Broersbank\_214339\_R06 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 06-06-2016.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode Jun2015-Aug2015. Monitoring Broersbank\_214339\_R07 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 30-05-2016.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode Sep2015-Dec2015. Monitoring Broersbank\_214339\_R08 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 30-05-2016.

Ortega Yamamoto, H., J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank boeidata – Ruwe datarapport periode Jan2016-Apr2016. Monitoring Broersbank\_214339\_R09 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 05-07-2016.

- Ortega Yamamoto, H., H. Komijani, J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank – Resultaten Modelling (periode Jun 2015 – Aug 2015). Monitoring Broersbank\_214339\_R10 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 31-08-2016.
- Ortega Yamamoto, H., H. Komijani, J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank – Resultaten Modelling (periode Sep 2015 – Nov 2015). Monitoring Broersbank\_214339\_R11 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 30-10-2016.
- Ortega Yamamoto, H., H. Komijani, J. Monbaliu, 2016. Monitoring Broersbank – Resultaten Modelling (periode Dec 2015 – Mar 2016). Monitoring Broersbank\_214339\_R12 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 23-12-2016.



## **Rapporten Project Broersbank 214341**

- Komijani, H., H. Ortega Yamamoto, J. Monbaliu, 2015. Conceptmodel Telemac 2D. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Broersbank\_214341\_R06 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 24-07-2015.
- Komijani, H., H. Ortega Yamamoto, J. Monbaliu, 2016. Concept golfmodel TOMAWAC. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Broersbank\_214341\_R02 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 30-04-2016.
- Komijani, H., H. Ortega Yamamoto, G. Decorte, J. Monbaliu, 2016. Concept kustrookmodel: TELEMAC-2D-kust en TOMAWAC-kust. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Broersbank\_214341\_R03 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 31-08-2016.
- Komijani, H., H. Ortega Yamamoto, J. Monbaliu, 2016. Concept Koppeling TELEMAC-TOMAWAC Noordzee. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Broersbank\_214341\_R03 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 31-10-2016.
- Komijani, H., H. Ortega Yamamoto, J. Monbaliu, 2016. Concept Koppeling TELEMAC-TOMAWAC Noordzee. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Broersbank\_214341\_R04 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 31-10-2016.
- Komijani, H., H. Ortega Yamamoto, J. Monbaliu, 2016. Koppeling TELEMAC-TOMAWAC kust. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Broersbank\_214341\_R05 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 31-10-2016.
- Komijani, H., H. Ortega Yamamoto, Q. Zhang, J. Monbaliu, 2017. Vergelijkende modellering. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Broersbank\_214341\_R06 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, 10-04-2017.
- Monbaliu, J. 2017. Monitoring Broersbank – Opstellen van een hydrodynamische modellensuite TELEMAC-TOMAWAC voor de Broersbank. Samenvattende nota. Broersbank\_214341\_R07 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, augustus 2017.

## **Reference to this report**

Monbaliu, J. 2017. Monitoring Broersbank- Samenvattende nota. Monitoring Broersbank\_212176\_R13 in opdracht van Afdeling Kust - Agenschap Maritieme Dienstverlening en Kust - Vlaamse Overheid, Laboratorium voor Hydraulica KU Leuven, juli 2017.